

УДК 621.923

Ю.К. Новосёлов, д-р техн. наук, С.М. Братан, д-р техн. наук,  
В.Б. Богуцкий, Севастополь, Украина

## **АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Наведено методику розрахунку параметрів шорсткості поверхні для умов плоского та круглого зовнішнього шліфування.*

*Приведена методика расчета параметров шероховатости поверхности для условий плоского и круглого наружного шлифования.*

*The design procedure of surface roughness parameters for the conditions of the round external grinding.*

Основными параметрами качества обрабатываемой поверхности являются ее шероховатость и глубина дефектного слоя. По ГОСТ 2789-73 регламентируются высотные параметры шероховатости:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{\max}$ . Обычно определение этих параметров сводится к табулированию профилеграмм и дальнейшим вычислениям с помощью ЭВМ.

Процессы шлифования имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности финишных методов. Микрорельеф шлифованной поверхности представляет собой совокупность отображений в материале заготовки поверхностей резания, образованных при движении режущих кромок инструмента в пространстве обрабатываемой заготовки. Форма единичных рисок определяется формой режущих кромок, особенностями контакта с материалом поверхности.

Аналитические зависимости для определения важнейших параметров шероховатости поверхности при условии, что случайный процесс, описывающий ординаты, является стационарным и нормальным, получены в работах Ю.Р. Витенберга, А.П. Хусу, Ю.В. Линника и ряда других исследователей. Параметры шероховатости вычислены по корреляционным функциям. Вид функции принимается известным, а её коэффициенты определяются на основе экспериментальных исследований процесса шлифования.

Основы прогнозирования важнейших параметров шероховатости поверхности по технологическим факторам рассмотрены в работах [5,9].

Известные зависимости с учетом влияние на неровности процессов, возникающих в динамической системе, существенно уточнены в работе [9], где расчет параметров шероховатости выполнен на основе функционалов, полученных при теоретическом анализе процессов формообразования поверхностей.

1. Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  вычисляется:

$$R_a = \frac{\sqrt{2}V_u H_u^{3/2}}{\pi^2 K_c (V_k \pm V_u) n_g \sqrt{D_9 \rho_g} \sum_{i=0}^n (W_m - i\Delta r)^{3/2}} \quad \text{при } \Delta r < W_m; \quad (1)$$

$$R_a = \frac{0,25V_u^{0,4} t_f^{0,6}}{K_c^{0,4} (V_k \pm V_u)^{0,4} n_g^{0,4} D_9^{0,2} \rho_g^{0,2}} \quad \text{при } \Delta r \geq W_m. \quad (2)$$

где  $W_m$  – расстояние от наиболее глубокой впадины до средней линии профиля вычисляется из условия  $y_m = 0$ ,

$P(M) = 0,5$ ,  $G_k \sum_{i=0}^n (W_m - i\Delta r)^\nu - \ln 2 = 0$ . При величине радиального съема

металла  $\Delta r \geq W_m$   $W_m = \left( \frac{\ln 2}{G_k} \right)^{1/\nu}$ .

$$\text{где } G_k = \frac{\sqrt{\pi D_9} \Gamma(m+1) \Gamma(\chi) \chi K_c C_b (V_k \pm V_u) n_g}{\Gamma(m + \chi + 3/2) V_u H_u^\chi} \quad (3)$$

при частных значениях  $m = 0,5$ ,  $\chi = 1,5$  зависимость (3) принимает вид:

$$G_k = \frac{0,598 \sqrt{\pi \rho_g D_9} K_c (V_k \pm V_u) n_g}{V_u H_u^{1,5}} \quad (4)$$

$$\Delta r = \frac{t_f^2}{1,478 t_f + \frac{13,66 V_u}{K_c (V_k \pm V_u) n_g \sqrt{D_9 \rho_g}}}; \quad (5)$$

$$t_f = 0,739\Delta r + \sqrt{0,546(\Delta r)^2 + \frac{13,66V_u\Delta r}{K_c(V_k \pm V_u)n_g\sqrt{D_3\rho_g}}}; \quad (6)$$

где в формулах (1), (2), (3), (4), (5), (6):  $K_c$  – коэффициент стружкообразования (он показывает, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется и образует по краям риски навалы);  $n_g$  – количество вершин зерен на единицу поверхности рабочего слоя круга;  $H_u$  – величина слоя рабочей поверхности круга по глубине, в пределах которого подсчитывается число абразивных зерен  $n_g$ ;  $P(M)$  – вероятность удаления металла;  $m$  и  $\chi$  – показатели степенной зависимости;  $\rho_g$  – радиус округления при вершине зерна;  $V_k$  – скорость круга;  $V_u$  – скорость детали;  $D_3$  – эквивалентный диаметр;  $\Delta r$  – радиальный сьем материала.

Уравнения (1) и (2) по своей структуре и величине показателей степени близко к имеющимся в литературе степенным зависимостям, но в отличие от них отражает физическую природу процесса формообразования и соответствуют теории размерностей.

2. Наибольшая высота неровностей профиля  $R_{\max}$  и высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ . Рассчитываются по величине слоя, в котором распределена шероховатость поверхности, и математическим ожиданиям расстояний от верхней границы слоя до пяти высших точек профиля и расстояний от нижней границы слоя до пяти низших точек профиля. Для стационарного процесса, близкого к нормальному, можно считать, что расстояния от верхней границы слоя шероховатости до наиболее выступающих вершин профиля распределены по законам, аналогичным распределению расстояний от впадин до нижней границы слоя. В этом случае математическое ожидание значений параметров  $R_{\max}$  и  $R_z$  определяются как

$$M[R_{\max}] = H - 2\sqrt{\frac{2V_u t_f^{3/2}}{3n_g(V_k \pm V_u)L\sqrt{D_3}}}; \quad (7)$$

$$M[R_z] = H - 2,95\sqrt{\frac{V_u t_f^{3/2}}{n_g(V_k \pm V_u)L\sqrt{D_3}}}. \quad (8)$$

где  $H = t_f - \Delta r$  – величина слоя шероховатости поверхности (размер переходной области материал – среда).

3. Расстояние от линии выступов до средней линии и относительная опорная площадь на уровне средней линии определяется по параметрам кривой опорной поверхности и среднему арифметическому отклонению профиля:

$$R_p = \left[ \frac{R_a (\nu_p + 1) R_{\max}^{\nu_p}}{2b} \right]^{\frac{1}{\nu_p + 1}}; \quad (9)$$

$$t_{Rp} = \frac{R_a (\nu_p + 1)}{2R_p}. \quad (10)$$

Одним из основных параметров рабочей поверхности инструмента, в значительной степени влияющего на характеристики шероховатости обрабатываемой поверхности является радиус округления вершины зерна  $\rho_g$ . По данным Д.В. Ваксера [3], Г.М. Ипполитова [4] и ряда других исследователей [6,8], радиус при вершине зерна зависит от материала абразивного зерна, способа изготовления, зернистости, режима правки инструмента.

Текущий радиус округления зависит от его исходного значения, условий контакта абразивного зерна с обрабатываемым материалом, режима резания и времени работы инструмента. С увеличением  $\tau$  закономерно увеличивается  $\rho_g(\tau)$ , на вершине зерна, в плоскости перпендикулярной вектору скорости резания, появляется радиусная площадка износа, наблюдается затупление абразивного зерна.

В общем случае можно записать

$$\rho_g(\tau) = K_{\rho_g} \cdot \rho_{g0}, \quad (11)$$

где  $K_{\rho_g}$  – коэффициент учитывающий изменение радиуса округления зерна в процессе работы абразивного инструмента;  $\rho_{g0}$  – исходный радиус округления вершины зерна.

Для выполнения практических расчетов целесообразнее было бы использовать характеристики абразивного материала, приведенные в ГОСТ 3647-80 или в ISO 8486-1,2:1996(E), такие как зернистость или основной размер абразивного зерна  $B_g$ . На основе анализа экспериментальных

данных, представленных в работах ряда авторов, составлена таблица 1 отражающая зависимость исходного радиуса округления вершин зерен  $\rho_{g0}$  от основного размера абразивного зерна  $B_g$ .

Таблица 1 – Исходные радиусы округления вершин абразивных зерен  $\rho_{g0}$ .

Источник	Зернистость по ГОСТ 3647-80 и ISO 8486-1,2:1996(E)										
	16	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
	F80	F60	F54	F46	F36	F30	F24	F20	F16	F12	F10
	Основной размер абразивных зерен $B_g$ , мкм										
	160	240	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Исходный радиус округления вершин зерен $\rho_{g0}$ , мкм											
Байкалов А.К. [1]	13	19	–	28	–	–	–	–	–	114	
Маслов Е.Н. [7]	11	17	25		41			76	–	–	–
Мурдасов А.В. [8]	–	19	–	30	–	–	68	–	97	115	130
Ваксер Д.Б. [3]	14	21		30	–	–	–	–	–	–	–
Королев А.В. [5]	12	–	–	–	–	48	–	–	93	119	149
Божко Т.Е. [2]	13	19	27	28	38	–	60	–	–	–	–

Аппроксимация степенной зависимости проводилась на основе данных приведенных в таблице 1 методом наименьших квадратов.

Полученная экспериментальная зависимость имеет вид:

$$\rho_{g0} = 0.0535 \cdot B_g^{0.955} \quad (12)$$

В таблице 2 приведено сопоставление средних значений экспериментальных данных по таблице 1 и значений рассчитанных по формуле (12), графически это сравнение показано на рис. 1. Проверка по коэффициенту корреляции и критерию Фишера показала адекватность предложенной зависимости (12).

С учетом (12) зависимость (11) примет вид

$$\rho_g(\tau) = K_{\rho_g} \cdot \rho_{g0} = 0,0535 \cdot K_{\rho_g} \cdot B_g^{0.955}, \quad (13)$$

Таблица 2 – Сопоставление экспериментальных и расчетных значений радиусов округления вершин зерен  $\rho_{g0}$ .

Источник	Зернистость по ГОСТ 3647-80 и ISO 8486-1,2:1996(E)										
	16	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
	F80	F60	F54	F46	F36	F30	F24	F20	F16	F12	F10
	Основной размер абразивных зерен $B_g$ , мкм										
	160	240	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Радиус округления вершин зерен $\rho_{g0}$ , мкм											
Среднее значение экспериментальных данных по табл. 1	12,6	19	26	29	39,5	48	64	76	95	115,3	139,5
Расчетное значение по формуле (12)	12,8	19,4	24,5	30,7	38,1	47,6	59,6	74,3	92,4	115,4	143

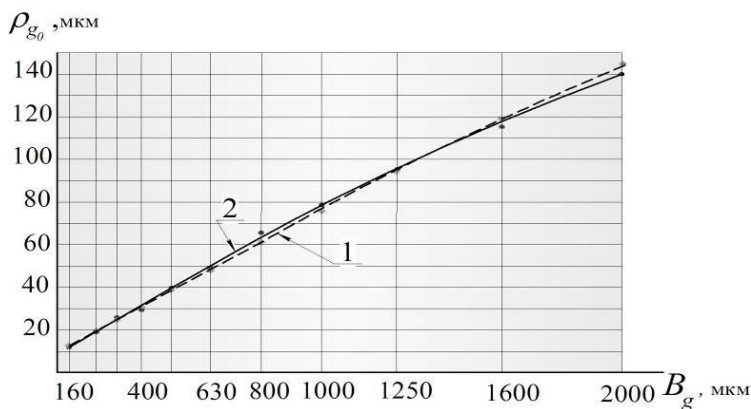


Рисунок 1 – Сопоставление расчетных (1) и экспериментальных (2) зависимостей между радиусом при вершине зерна  $\rho_{g0}$  и основным размером абразивных зерен  $B_g$

Как показано в [9], для любой точки профиля абразивного зерна (рис. 2) радиус кривизны в полярных координатах вычисляется по уравнению:

$$\rho_g(\tau) = \frac{[R_g^2(\varphi, \tau) + R_g'^2(\varphi, \tau)]^{3/2}}{R_g^2(\varphi, \tau) + 2R_g'^2(\varphi, \tau) - R_g(\varphi, \tau)R_g''(\varphi, \tau)}. \quad (14)$$

При совмещении полюса полярных координат с центром кривизны вершины зерна для углов окрестности  $\varphi_\rho = 0$  радиус-вектор исходного профиля равен  $\rho_{g0}$ , а его текущее значение

$$R_g(\varphi_\rho, \tau) = \rho_{g0}(1 - \psi(\varphi_\rho, \tau)) - \frac{H - u_\rho}{\cos \varphi_\rho} \psi(\varphi_\rho, \tau),$$

где  $\varphi_\rho$  – полярный угол точек профиля вершины зерна;  $u_\rho$  – расстояние от максимальной впадины исходного профиля до центра кривизны исходного профиля вершины зерна.

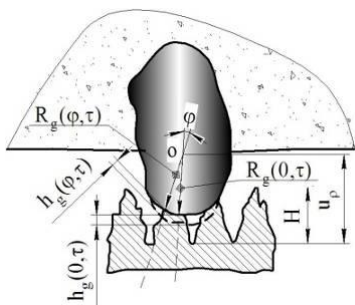


Рисунок 2 – Схема к расчету изменения контура абразивного зерна

Текущий радиус округления вершины зерна вычисляется по текущему радиус-вектору и его первой и второй производным по уравнению (14) при  $\varphi_\rho = 0$ .

$$\rho_g(\tau) = \frac{(\rho_{g0} + B - Be^A)^2}{\rho_{g0} - A\rho_{g0} - BA} e^{-A}, \quad (15)$$

где за  $A$  и  $B$  обозначено:  $A = \frac{h_0(V_k \pm V_u)\tau}{H}$ ;  $B = H - u_\rho$ .

Коэффициент учитывающий изменение радиуса округления зерна в процессе работы абразивного инструмента  $K_{\rho_g}$  можно представить как

$$K_{\rho_g} = \frac{\rho_g(\tau)}{\rho_{g0}},$$

или после выполнения преобразования

$$K_{\rho_g} = \frac{18,692H(0,0535B_g^{0,955} + (H - u_\rho)(1 - e^{\left(\frac{h_0(V_k \pm V_u)\tau}{H}\right)})^2 e^{-\left(\frac{h_0(V_k \pm V_u)\tau}{H}\right)})}{(0,0535B_g^{0,955}(1 - h_0(V_k \pm V_u)\tau) - h_0(V_k \pm V_u)(H - u_\rho)\tau)B_g^{0,955}}, \quad (16)$$

где  $h_0$  – относительный износ абразивного материала;  $\tau$  – время работы абразивного инструмента.

На рис. 3 показаны графики, позволяющие оценить влияние времени работы шлифовального круга на изменение радиуса округления вершины абразивного зерна.

$\rho_g(\tau), \text{мкм}$

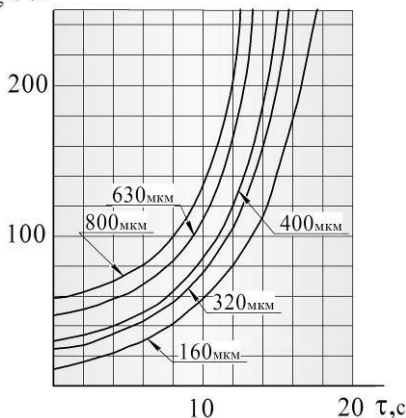


Рисунок 3 – Влияние времени работы шлифовального круга на изменение радиуса округления вершины абразивного зерна  $\rho_g(\tau)$  для различных величин основного размера абразивных зерен  $B_g$

Количество зерен  $n_g$  на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности шлифовального круга, входящее в зависимости (1), (2), (4), (5), (6), (7), (8), также во многом определяется основным размером абразивных зерен  $B_g$ . В тоже время, имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют и о существенном изменении числа режущих кромок за период стойкости инструмента. Вследствие ограниченной прочности абразивных зерен и их заделки в инструменте при каждом контакте с обрабатываемым материалом часть зерен будет разрушаться или вырываться из круга. Одновременно в работу будут вступать новые режущие кромки, лежащие в глубинных слоях инструмента. Поэтому, в общем случае можно записать



$$n_g(\tau) = K_{n_g} \cdot n_{g_0} \quad (17)$$

где  $K_{n_g}$  – коэффициент учитывающий изменение количества абразивных зерен на рабочей поверхности круга в период между правками;  $n_{g_0}$  – исходное количество абразивных зерен на рабочей поверхности круга.

Исходное количество абразивных зерен на рабочей поверхности круга  $n_{g_0}$  определялось по [11] с учетом содержания абразивных зерен в круге  $V_g$  %, основного размера абразивных зерен по ГОСТ 3647-80  $B_g$ , структуры и твердости (для кругов со структурами 5...6 и твердостью СМ1  $V_g = 45\%$  [4]) и аппроксимировалось методом наименьших квадратов, что позволило получить зависимость:

$$n_{g_0} = 0,62 \cdot B_g^{-1,99} \cdot \frac{1}{M^2} \cdot \quad (18)$$

В таблице 3 приведено сравнение количества зерен на 1 мм<sup>2</sup> рассчитанных по [11] и расчетные значения по формуле (18), графически это сравнение показано на рисунке 4. Проверка по коэффициенту корреляции и критерию Фишера показала значимость уравнения (18).

Таблица 3 – Сопоставление значений исходного количества абразивных зерен  $n_{g_0}$

	Зернистость по ГОСТ 3647-80 и ISO 8486-1,2:1996(E)										
	16	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200
	F80	F60	F54	F46	F36	F30	F24	F20	F16	F12	F10
	Основной размер абразивных зерен $B_g$ , мкм										
	160	240	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
	Количество зерен, $n_{g_0}$ , $\frac{1}{\text{мм}^2}$										
Значение по [11]	23,2	9,2	5,7	3,56	2,28	1,44	0,89	0,57	0,366	0,224	0,144
Расчетное значение по формуле (18)	22,4	9,4	5,6	3,57	2,29	1,44	0,89	0,57	0,369	0,226	0,145

С учетом (18) формула (17) примет вид

$$n_g(\tau) = K_{n_g} \cdot n_{g_0} = 0,62 \cdot K_{n_g} \cdot B_g^{-1,99} \cdot \frac{1}{M^2} \quad (19)$$

В работе [9] выведена зависимость, позволяющая рассчитать изменение числа зерен за период между правками абразивного инструмента;

$$n_g(\tau) = \frac{z_g}{P_p} + \left( n_{g0} - \frac{z_g}{P_p} \right) (1 - P_p)^{v_k \tau}, \quad (20)$$

где  $z_g$  – число абразивных зерен, вступающих в работу при  $i$ -м контакте инструмента с поверхностью;  $P_p$  – вероятность разрушения зерна;  $v_k$  – частота вращения круга;  $\tau$  – время работы круга после правки.

В общем случае  $z_g$  зависит от числа зерен на поверхности инструмента после правки  $n_{g0}$ , закона распределения зерен по глубине, радиального износа круга, прочности закрепления зерен и сил резания, возникающих в зоне контакта, которые являются случайными величинами. Так, если нагрузка на вершины зерен при шлифовании не превышает 4 Н, то вероятность вырывания зерна из связки  $P_p$  не превышает 0,01. С увеличением нагрузки вероятность  $P_p$  – растет: для  $P_z = 8H$  вероятность  $P_p \Rightarrow 0,20$ , при  $P_z = 10H$   $P_p \approx 0,50$ . С дальнейшим увеличением  $P_z$  вероятность  $P_p$  приближается к своему максимальному значению около 0,87 ( $P_z = 15H$ ). [12]

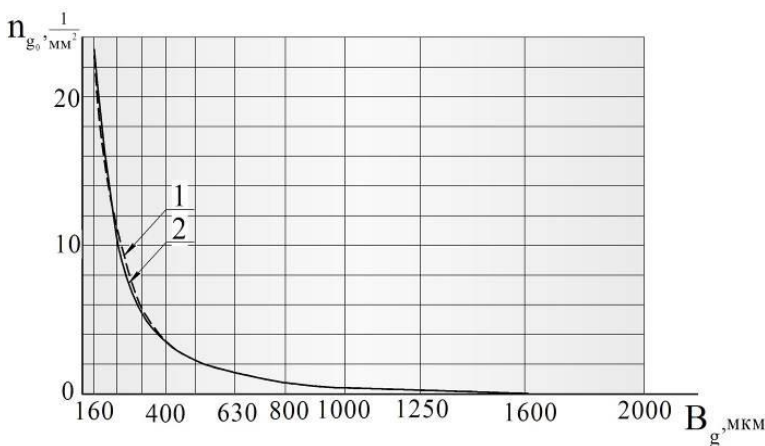


Рисунок 4 – Сопоставление зависимостей между основным размером абразивных зерен  $B_g$  (зернистостью) и количеством зерен на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности шлифовального круга  $n_{g0}$ : 1 – результаты расчета по формуле (18); 2 – по данным [11]

Коэффициент учитывающий изменение числа зерен на поверхности инструмента в процессе его работы  $K_{n_g}$  можно представить как или после выполнения преобразования с учетом зависимостей (18) и (20)

$$K_{n_g} = \frac{n_g(\tau)}{n_{g0}}$$

$$K_{n_g} = 1,613 \left( \frac{z_g(1-(1-P_p)^{V_k\tau}}{P_p} + \frac{0,62(1-P_p)^{V_k\tau}}{B_g^{1,99}} \right) B_g^{1,99} \quad (21)$$

На рис. 5 показаны зависимости, позволяющие оценить влияние времени на изменение количества абразивных зерен  $n_g$  на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности шлифовального круга при работе круга в режиме затупления.

С учетом полученных зависимостей (13) и (19) формулы для расчета характеристик шероховатости поверхности (1), (2), (5), (6), (7), (8) примут вид:

$$R_a = \frac{1,017V_u H_u^{1,5}}{K_c K_{n_g} (V_k \pm V_u) \sqrt{K_{\rho_g} B_g^{-3,025} D_3} \sum_{i=0}^n (W_m - i\Delta r)^{1,5}} \quad \text{при } \Delta r < W_m; \quad (22)$$

$$R_a = \frac{0,544V_u^{0,4} t_f^{0,6} B_g^{0,605}}{K_c^{0,4} K_{n_g}^{0,4} K_{\rho_g}^{0,2} (V_k \pm V_u)^{0,4} D_3^{0,2}} \quad \text{при } \Delta r \geq W_m. \quad (23)$$

где

$$\Delta r = \frac{t_f^2}{1,478t_f + \frac{95,254V_u B_g^{1,51}}{K_c K_{n_g} (V_k \pm V_u) \sqrt{K_{\rho_g} D_3}}}.$$

$$t_f = 0,739\Delta r + \sqrt{0,546 \cdot \Delta r^2 + \frac{22,03V_u \Delta r B_g^{1,51}}{K_c K_{n_g} (V_k \pm V_u) \sqrt{K_{\rho_g} D_3}}}; \quad (24)$$

$$M[R_{\max}] = H - 2,074 \sqrt{\frac{V_u t_f^{1,5} B_g^{1,99}}{K_{n_g} (V_k \pm V_u) L \sqrt{D_3}}}; \quad (25)$$

$$M[R_z] = H - 3,747 \sqrt{\frac{V_u t_f^{1,5} B_g^{1,99}}{K_{n_g} (V_k \pm V_u) L \sqrt{D_9}}} \quad (26)$$

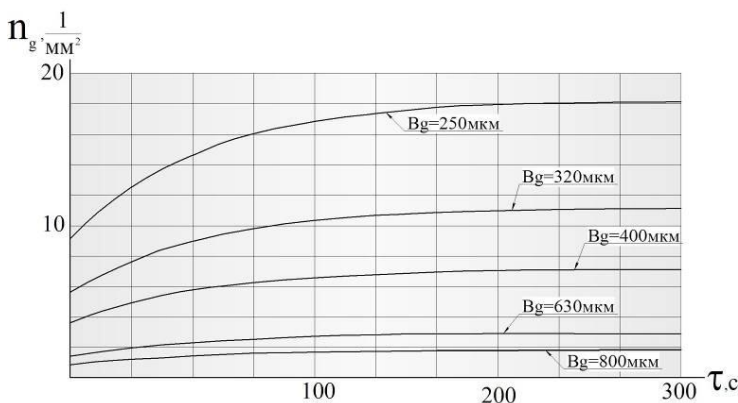


Рисунок 5 – Влияние времени работы шлифовального круга на изменение количества зерен на 1 мм<sup>2</sup> поверхности  $n_g(\tau)$  для различных величин  $B_g$

На рис. 6 показаны графики, иллюстрирующие влияние времени работы шлифовального круга на параметры шероховатости обрабатываемой поверхности. Все расчеты выполнены с соблюдением размерностей, рекомендованных системой СИ.

В оптимальную систему характеристик шероховатости, кроме вышеперечисленных, входят параметры кривой опорной поверхности: расстояние от линии выступов до средней линии  $R_p$ , относительная опорная площадь на уровне средней линии  $t_{Rp}$  [13].

При оценке несущей способности шероховатости кривая опорной поверхности, построенная в относительных координатах, обычно описывается уравнением  $t_p = b\varepsilon^{\nu_p}$  ( $\varepsilon$  – относительное расстояние от линии выступов,  $\varepsilon = Y/R_{\max}$ , где  $Y$  – расстояние от линии выступов до рассматриваемого уровня). При выражении через технологические параметры коэффициенты аппроксимирующего уравнения кривой опорной поверхности легко получить методом наименьших квадратов, имея расчетные значения  $t_p$ . С достаточной точностью ( $\pm 2,8\%$ ) они могут быть определены также по двум, трем точкам действительной кривой. Так,

расчетные значения  $t_p$  для точек с координатами  $Y = 0,25R_{\max}$  и  $Y = 0,5R_{\max}$  соответственно равны [9]

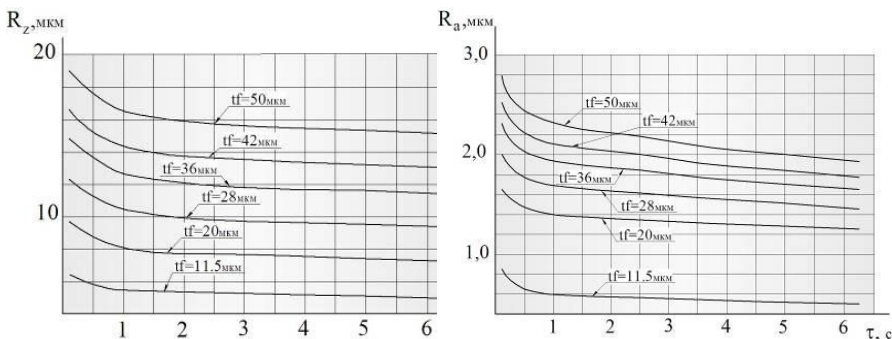


Рисунок 6 – Влияние времени работы шлифовального круга  $\tau$  на параметры шероховатости  $R_z$  и  $R_a$  ( $B_g = 320 \mu\text{м}$ )

$$t_{25} = \exp \left[ -G \sum_{i=0}^n \left( \frac{t_f - \Delta r}{2} + \frac{R_{\max}}{4} - i\Delta r \right)^{5/2} \right]; t_{50} = \exp \left[ -G \sum_{i=0}^n \left( \frac{t_f - \Delta r}{2} - i\Delta r \right)^{5/2} \right] \quad (27)$$

При вычислении по аппроксимирующему уравнению

$$t_{25} = b(0,25)^{\nu_p}, \quad t_{50} = b(0,5)^{\nu_p} \quad (28)$$

Совместное решение уравнений (27) и (28) с учетом уравнений (13), (19) дает

$$\nu_p = 1,443G \left( \sum_{i=0}^n \left( \frac{t_f - \Delta r}{2} + \frac{R_{\max}}{4} - i\Delta r \right)^{2,5} - \sum_{i=0}^n \left( \frac{t_f - \Delta r}{2} - i\Delta r \right)^{2,5} \right) \quad (29)$$

$$b = \frac{\exp \left( G \sum_{i=0}^n (0,5(t_f - \Delta r) - i\Delta r)^{2,5} \right)}{0,5 \left( 1,443G \left( \sum_{i=0}^n (0,5(t_f - \Delta r) + 0,25R_{\max} - i\Delta r)^{2,5} - \sum_{i=0}^n (0,5(t_f - \Delta r) - i\Delta r)^{2,5} \right) \right)} \quad (30)$$

где -----

$$G = \frac{0,256K_c K_{n_g} (V_k \pm V_u) \sqrt{K_{\rho_g} D_g}}{V_u H_u^{1,5} B_g^{1,5125}}$$

По параметрам кривой опорной поверхности и среднему арифметическому отклонению профиля могут быть определены расстояние от линии выступов до средней линии и относительная опорная площадь на уровне средней линии

$$R_p = \left[ \frac{R_a(\nu_p + 1)R_{\max}^{\nu_p}}{2b} \right]^{\frac{1}{\nu_p + 1}}; \quad t_{Rp} = \frac{R_a(\nu_p + 1)}{2R_p}.$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений относительной опорной длины профиля для процесса круглого наружного шлифования образцов из стали 9Х2 диаметром 50 мм кругами 1-300х40х127 24А 25-Н СМ2 4Б приведено на рис. 7 ( $K_c = 0,9$ ;  $V_k = 35$  м/с;  $V_u = 0,25$  м/с;  $n_g = 5,2$  1/мм<sup>2</sup>;  $\rho_g = 0,021$  мм;  $t_f = 0,0116$  мм;  $\Delta r = 3,3 \cdot 10^{-3}$  мм; значение базовой длины  $L = 0,8$  мм). Линии 2 ограничивают область, в которой разместились десять экспериментальных кривых при совмещении их точек со средней линией профиля. Вычисленные значения относительной опорной длины профиля для всех уровней не выходят за пределы разброса экспериментальных данных.

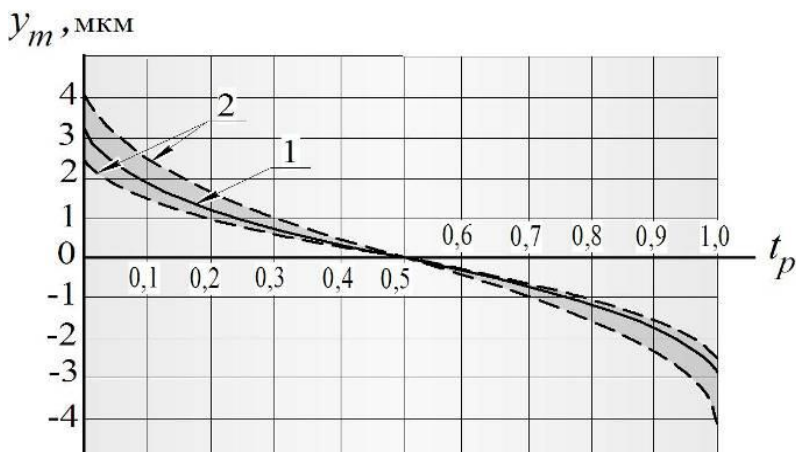


Рисунок 7 – Опорные кривые шлифованной поверхности:  
1 – расчетные значения, 2 – область экспериментальных значений

Особенностью полученных уравнений является то, что при расчетах учитываются параметры режима резания, размер зерна шлифовального круга, а также изменение состояния рабочей поверхности инструмента в процессе обработки. Это позволяет оценить влияние на параметры шероховатости многопроходности процесса шлифования.

Предложенные зависимости позволяют прогнозировать кинетику изменения параметров шероховатости. В уравнения (25) и (26) неявно входит вероятность удаления материала, которая вычисляется с учетом шероховатости заготовки и ее изменений при каждом контакте поверхности с инструментом.

**Список использованных источников:** 1. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов /А.К.Байкалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с. 2. Божко Т.С. Формування поверхневого шару у деталей із порошкових матеріалів при шліфуванні./Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук. Луцьк, 2011. 3. Ваксер Д.Б. Влияние геометрии абразивного зерна на свойства шлифовального круга /Д.Б.Ваксер // Основные вопросы высокопроизводительного шлифования: сб. М.: Машгиз, 1960. – 165 с. 4. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка/ Г.М.Ипполитов, М., Машиностроение, 1969, 334 с. 5. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч.1/А.В.Королев, Ю.К.Новоселов. – Саратов: Саратовск. ун-т, 1987. – 160 с. 6. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении/ З.И.Кремень, В.Г.Юрьев. А.Ф.Бабошкин; под общ. ред. З.И.Кремня. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с. 7. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов/Е.Н.Маслов. М.: Машиностроение, 1974. – 400 с. 8. Мурдасов А.В. Особенности работы шлифовальных кругов из абразивного зерна разной формы/ А.В.Мурдасов, А.М.Вульф //Абразивы и алмазы: науч. технич. реф. сб. – М.: НИИМАШ, 1967. №4. – С.65-69. 9. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке./ Ю.К.Новоселов – Севастополь: Из-во СевНТУ, 2013. – 304 с. 10. Пермяков А.А. Повышение эффективности предварительного шлифования прокатных валков за счет восстановления режущей способности круга без правки/ А.А.Пермяков, А.А.Жижев. Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 118/2011. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. — Севастополь, 2011. 11. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. Резникова А.Н.. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с. 12. Крутикова А.А. Вероятности видов изнашивания зерен абразивного инструмента и их взаимосвязь с характеристикой круга/А.А. Крутикова, М.В.Даниленко. Материалы III Международной научной студенческой конференции «Научный потенциал студенчества в XX веке». Том первый. Технические и прикладные науки. г. Ставрополь: СевКавГТУ, 2009. – 278 с. 13. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

*Поступила в редколлегию 15.11.2012*